

Relación entre la complejidad estructural frágil y la distribución espacial de la sismicidad en tres regímenes tectónicos diferentes (Sur de Centro América)

A. Muñoz Martín¹, M. Arcila^{1,2}, R. Pérez¹, M.A. Rodríguez Pascua¹ y G. De Vicente¹

¹ Departamento de Geodinámica, Facultad CC. Geológicas, Universidad Complutense, 28040 Madrid, España. amunoz@eucmos.sim.ucm.es

² Ingeominas, A.A. 695 Popayán, Colombia.

ABSTRACT

Fracturation process is the main geological mechanism for earthquakes generation as well as their magnitude and spatial distribution. In this work we analyze the correlation among a geometric, cinematic and dynamic fault-slip analysis with the magnitude frequency distribution (M_s) and the epicentral setting into three different tectonic areas. In order to compare all these parameters these areas have the same surface ($2^\circ \times 2^\circ$) and a similar number of epicentres. The brittle structural complexity has been defined by means an index which depends on the number of active structures as well as the different type of active faults under the present-day stress tensor. The obtained results seem indicate that a bigger index of brittle structural complexity has a good relationship with an increasing of the "b" value and with a bigger complexity in the spatial distribution of earthquakes defined by the fractal dimension (capacity dimension, D_{cap}).

Key words: seismicity, fractal analysis, stress inversion, Centro América, structural-complexity index

El análisis de la fracturación suele realizarse desde aspectos geométricos, cinemáticos y dinámicos. Éstos permiten analizar zonas de deformación frágil desde un punto de vista estructural y tectónico, y deducir su grado de complejidad.

Por otra parte la información sismológica además de aportar datos cuantitativos sobre aspectos geométricos, cinemáticos y dinámicos, permite analizar la distribución espacial y temporal del proceso sísmico. De este modo, mediante el análisis de la distribución espacial y la energía liberada por los sismos, es posible discutir el grado de complejidad de la fracturación, así como la intensidad del proceso.

Dado que la fracturación es el proceso que controla los aspectos anteriores, parece lógico pensar que debe existir algún tipo de relación entre la complejidad estructural frágil de una zona (número y tipo de fallas activas), con el grado de complejidad de la actividad sísmica.

En este trabajo se propone realizar un análisis comparado entre aspectos geométricos, cinemáticos y dinámicos de poblaciones de fallas deducidas a partir de mecanismos focales de terremotos, con el grado de irregularidad en la distribución espacial de la actividad sísmica.

Para lograr este objetivo se seleccionaron tres zonas próximas y con regímenes tectónicos diferentes (Fig. 1). Su selección se debe a que presentan una importante actividad

sísmica, existe buen catálogo de mecanismos focales de terremotos de calidad contrastada, y son zonas interesantes desde un punto de vista tectónico. Una vez seleccionadas las zonas, se analizaron los aspectos estructurales y se caracterizó la irregularidad de la distribución espacial de la actividad sísmica desde un punto de vista fractal. Finalmente se comparó el grado de complejidad estructural deducido del análisis de los mecanismos focales de terremotos, mediante un índice de complejidad estructural frágil (ICEF), con el grado de irregularidad en la actividad sísmica y con la intensidad del proceso. La irregularidad se cuantificó mediante el cálculo de la dimensión fractal de la distribución espacial de terremotos en el área de comportamiento autosemejante definido en cada una de ellas.

MARCO TECTÓNICO

El esquema tectónico para el sur de Centro América es bastante complejo y está controlado por la interacción de tres placas menores (Panamá, Coiba y Bloque Andino), situadas entre las placas de Cocos, Sur América, Caribe y Nazca, convergentes entre sí (Fig. 1). Esta situación se resuelve mediante límites de placas convergentes con subducción oceánica asociada (Coiba-Bloque Andino, Cocos-Panamá); convergencia entre placas continentales (Panamá-Bloque Andino); límites de placa transcurrentes (Co-

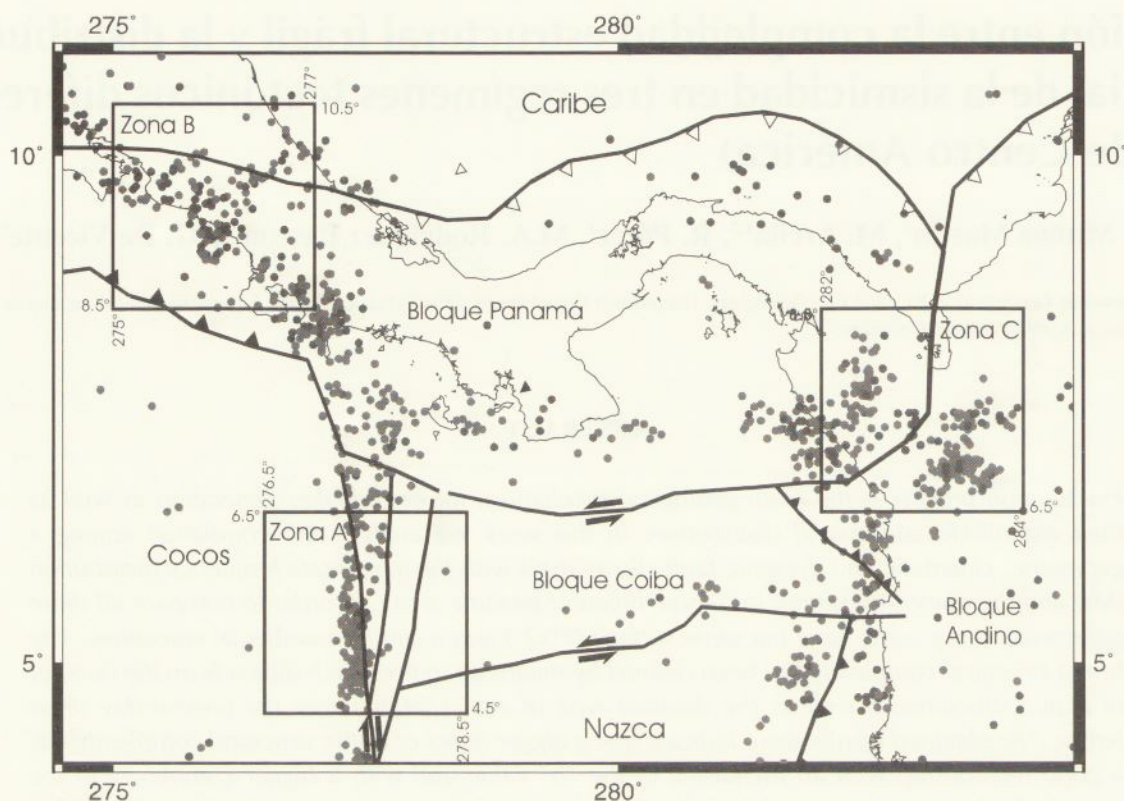


FIGURA 1: Marco tectónico regional, localización epicentral de terremotos (de Enghdal et al., 1998), y zonas seleccionadas en este trabajo.

cos-Coiba, Panamá-Coiba, Nazca-Coiba), y cinturones deformados (Caribe-Panamá, Caribe-Bloque Andino) (Kellogg y Vega, 1995, Arcila et al., 2000).

Las zonas seleccionadas comprenden una zona de transferencia en corteza oceánica (zona A), una zona de subducción corteza oceánica-corteza continental (zona B) y una zona de convergencia corteza continental-corteza continental (zona C) (Fig. 1).

ANÁLISIS DE LOS MECANISMOS FOCALES

En total se analizaron 89 mecanismos focales: 33 para la zona A, 31 para la zona B y 25 para la zona C, tomados 83 de ellos del catálogo CMT de la Universidad de Harvard (Dziewonski et al., 1981) y 6 de Pennington (1981). Los estados de esfuerzos se calcularon con el Método de Inversión de Esfuerzos (Reches et al., 1992) y para la selección de los planos nodales se siguió la metodología propuesta por Capote et al. (1991), basada en el Modelo de Deslizamiento (Reches, 1983).

La zona A, segmento sur de la Zona de Fractura de Panamá, presenta fallas de tipo desgarre con direcciones N-S y O-E y esfuerzo $\sigma_{H_{\max}}$ O-SO a E-NE (Fig. 2). La zona B, asociada a subducción de la placa de Cocos bajo Costa Rica, muestra fallas inversas para la subducción, y desgarres y fallas normal-direccionales hacia el interior de Costa Rica, con un esfuerzo horizontal máximo $\sigma_{H_{\max}}$ según S-SO a N-NE (Fig. 2). Finalmente, la zona C representa la convergencia Panamá-Bloque Andino, con fallas de tipo

inverso, inverso-direccionales y desgarres, resultado de la compresión triaxial asociada al punto triple; $\sigma_{H_{\max}}$ se dispone preferencialmente según NO-SE (Fig. 2).

ÍNDICE DE COMPLEJIDAD ESTRUCTURAL FRÁGIL

Las poblaciones de fallas generalmente presentan una serie de familias de planos que, cuando son neoformadas, presentan un único carácter y simetrías bien marcadas (Reches, 1983). Por el contrario, cuanto mayor sea el número de familias de fallas, menor simetría tengan, o más tipos de fallas aparezcan, mas tensores de esfuerzos las habrán activado y/o más planos previos habrán sido reactivados. De esta manera es posible definir un *Índice de Complejidad Estructural Frágil* (ICEF), que permita comparar de un modo cuantitativo esa complejidad en el patrón de la fracturación a diferentes zonas. El índice que se propone considera dos aspectos geométricos: número de familias de fallas activas (NF), definido por la concentración de los polos de los planos de deslizamiento, y número de tipos de fallas activas (NTF). El valor de este índice será el producto de ambos factores, y oscilará entre 1 y 50 (suponiendo un valor máximo de 10 familias y un máximo de 5 tipos diferentes de fallas):

$$ICEF = NF \cdot NTF \quad [1]$$

Para poder definir el índice, es necesario un número mínimo de fallas que debe ser superior al número necesario para definir un tensor de esfuerzos con grado de confianza

suficiente (al menos 10 fallas). En este caso, dado que las poblaciones analizadas superan los 25 planos y que los tensores presentan un buen ajuste, no se ha incorporado este efecto.

La aplicación de este índice a las tres zonas proporciona un valor mínimo de 8 (menor complejidad) para la zona de falla transformante (A), un valor intermedio de 12 para la zona de subducción (B) y un valor máximo de 21 para la zona de compresión triaxial (C), tal y como podría esperarse del análisis cualitativo de los estereogramas, así como de los tensores de esfuerzos calculados (Fig. 2).

ANÁLISIS FRACTAL DE LA DISTRIBUCIÓN DE LA SISMICIDAD

La información sismológica utilizada se tomó del catálogo de Engdahl *et al.* (1998), que relocaliza sismicidad mundial registrada entre 1964 y 1998, obteniendo 382 localizaciones hipocentrales para sismos con magnitudes m_b entre 4,6 y 6,4.

Para caracterizar la sismicidad de una región, históricamente se ha empleado el parámetro "b", cuyos valores pueden variar entre 0,6 y 1,5. En el presente trabajo, para el cálculo de "b", las magnitudes m_b se han pasado a magnitudes M_s ya que sólo se han considerado terremotos corticales (≤ 70 km); considerando así magnitudes M_s entre 4,8 y 7,8 para las tres zonas evaluadas.

Los valores del parámetro "b" (Relación de Gutenberg-Richter) aumenta para cada zona con la complejidad tectónica (Zona A: 1,43; Zona B: 1,45 y Zona C: 1,50) (Fig. 3a). Esta relación lleva consigo un aumento de la proporción de energía liberada por terremotos pequeños, lo cual no implica que no se puedan generar terremotos importantes. Este aspecto deber estar relacionado con la mayor complejidad tectónica, de tal manera que al haber más estructuras potencialmente activas, resulta más fácil alcanzar el umbral de esfuerzos para generar un terremoto en alguna de ellas.

Sobre las tres zonas se realizó un conteo binario de celdas (box-counting), mediante la superposición de un mallado regular, con el fin de determinar la dimensión de recubrimiento asociada a cada una (D_{cap}). El criterio geológico en la determinación del área de muestreo nos permitió obtener resultados correlacionables entre sí y tectónicamente coherentes con el entorno descrito. Delimitamos el tamaño de celda (e) entre 14.726 y 22.026 metros, intervalo donde la distribución espacial epicentral se ajusta según una ley de potencia cuyo exponente es la dimensión de recubrimiento ($N(e)$, número de celdas de tamaño e , con al menos un terremoto). La distribución espacial epicentral de la zona A, más localizada en una banda N-S, explica el valor más pequeño de la dimensión de recubrimiento (1,60), con un menor grado de complejidad en la distribución de epicentros frente a la zona C (1,73), área de mayor complejidad tectónica y con un elevado número de fuentes

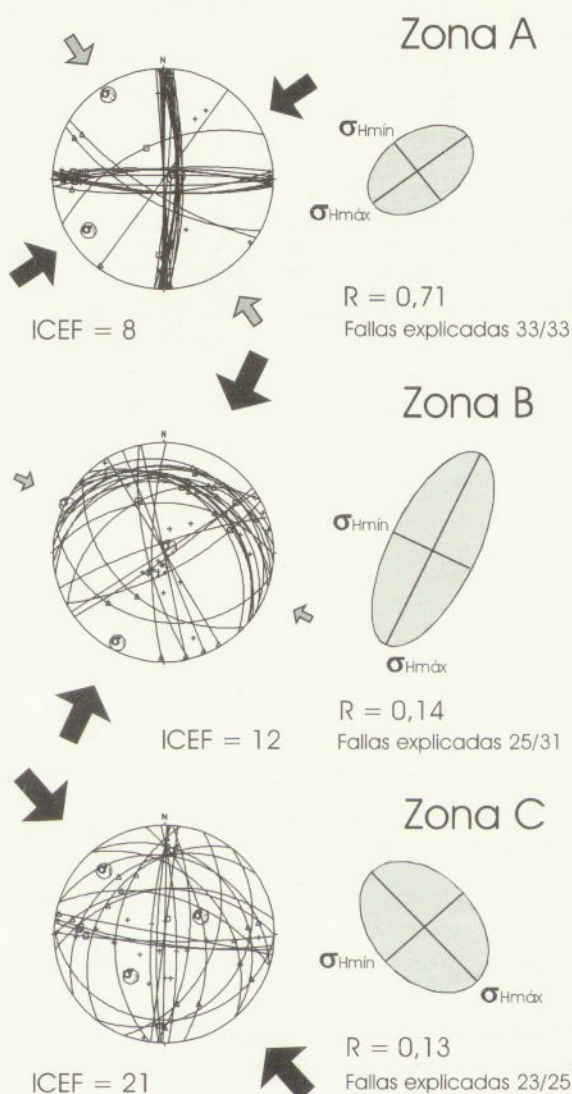


FIGURA 2: Estructuras activas deducidas de los mecanismos focales de terremotos, tensor de esfuerzos calculado e índices de Complejidad Estructural Frágil (ICEF) para las tres zonas seleccionadas.

sismogénicas para un mismo área de muestreo. La zona B presenta una dimensión de recubrimiento (1,66) intermedia. Esta dimensión de recubrimiento constituye la dimensión fractal de la distribución espacial epicentral (Turcotte, 1997) y podemos caracterizarla como un índice de complejidad tectónica. En todos los casos, las regresiones lineales sobre el gráfico bilogarítmico se realizaron con un coeficiente de regresión de 0,997 y unos residuales cercanos a 0,0005 (Fig. 3B, C y D).

CONCLUSIONES

El análisis comparado del grado de complejidad estructural con la distribución de magnitudes y espacial de los terremotos permite deducir un grado de correlación para las tres zonas analizadas.

De este modo, a mayor grado de complejidad estructural, el parámetro "b" es mayor, lo que indica un aumento de

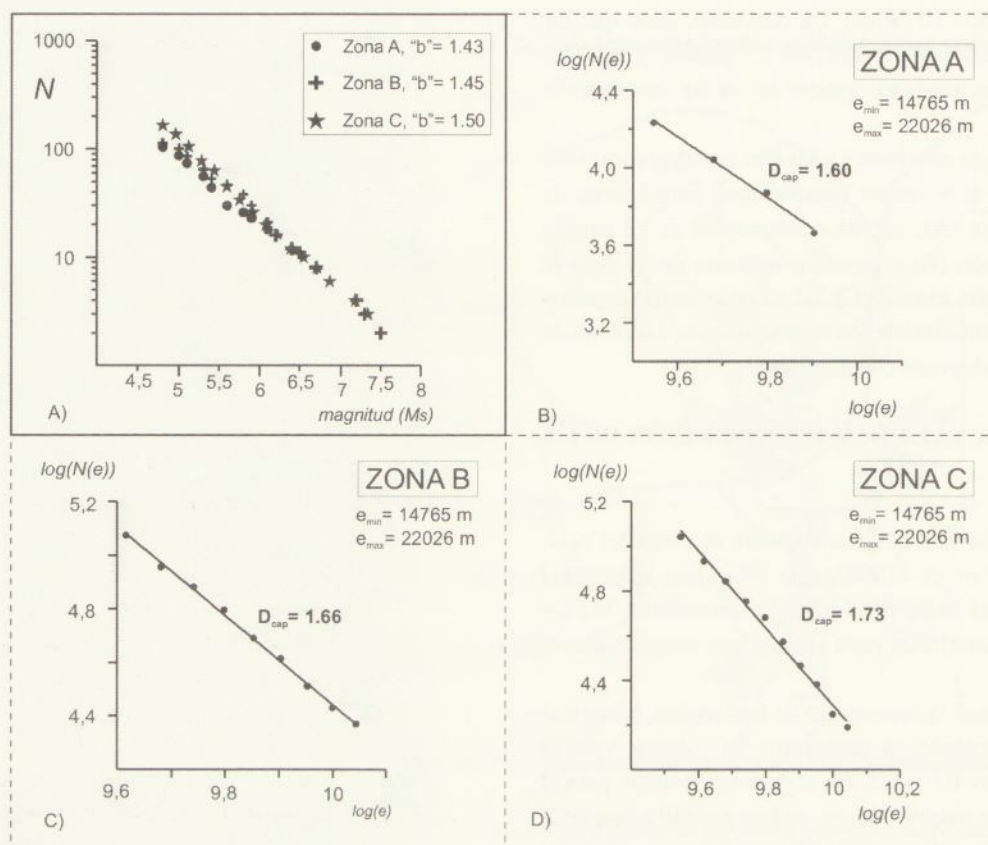


FIGURA 3: A) Cálculo de parámetro "b" para las tres zonas. B, C y D) Cálculo de la dimensión de recubrimiento de las zonas A, B y C para tamaños de celdas entre 14.726 y 22.026 metros.

la proporción de energía liberada por terremotos pequeños. Esta mayor proporción de terremotos de menor magnitud no implica que no se puedan generar terremotos importantes, sino que al haber más estructuras potencialmente activas en las zonas complejas, resulta más fácil alcanzar el umbral de esfuerzos para generar un terremoto en alguna de ellas.

Por otra parte, la mayor Complejidad Estructural Frágil en una zona se refleja también en la distribución espacial de los sismos. De este modo, a mayor complejidad estructural (mayor número de estructuras activas), mayor dimensión fractal se obtiene en la distribución espacial de los terremotos. Esto se ha detectado en las tres zonas analizadas, que presentan una extensión y un número de terremotos equivalente. Una mayor dimensión fractal de la distribución de epicentros implica una mayor complejidad en la distribución espacial de las estructuras sismogénicas. Este hecho está de acuerdo con el grado de complejidad estructural definido a partir de las poblaciones de mecanismos focales (más tipos de fallas activas y de características diferentes).

REFERENCIAS

- Arcila, M., Muñoz, A., De Vicente, G. (2000): Mapa de esfuerzos actuales en el Bloque Norte de Los Andes. Resúmenes 2ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica: 151-152.
- Capote, R., De Vicente, G., González Casado, J.M. (1991): An application of the slip model of brittle deformations to focal mechanism analysis in three different plate tectonics situations. *Tectonophysics*, 191: 399-409.
- Dziewonski, A.M., Chou, T.A. y Woodhouse, J.H. (1981): Determination of earthquakes source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity. *J. Geophysics Res.*, 86: 2825-2852.
- Engdahl, E.R., Van der List, R.D. y Buland, B. (1998): Global teleseismic earthquake relocation with improved travel times and procedures for depth relocation. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 88: 722-743.
- Kellogg, J.N. y Vega, V. (1995): Tectonic development of Panama, Costa Rica and Colombian Andes: Constraints from global position system geodetic studies and gravity. *Geol. Soc. Am. Bull. Special Paper*, 295: 75-90.
- Pennington, W.D. (1981): Subduction of the eastern Panama basin and seismotectonics of northwestern South America. *J. Geophys. Res.*, 86 (B11): 10753-10770.
- Reches, Z. (1983): Faulting of rocks in three-dimensional strain fields. II Theoretical analysis. *Tectonophysics*, 47: 109-129.
- Reches, Z., Baer, G. y Haztor, Y. (1992): Constraints on the strength of the Upper Crust from stress inversion of fault slip data. *J. Geophys. Res.*, 97 (B9): 12481-12493.
- Turcotte, D.L., (1997): *Fractal and Chaos in Geology and Geophysics*. Cambridge University Press. 398 p.